

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Výroba odlitků metodou vytavitelného modelu

Production of castings by investment casting

František Ouzký

KSP - SM - B34

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 49

Počet tabulek 2

Počet obrázků 21

Počet příloh 0

Datum: 27.5.2011

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Student: František Ouzký

Téma práce: Výroba odlitků metodou vytavitelného modelu

Číslo BP: KSP - SM - B34

Vedoucí BP: Ing. Iva Nováková, Ph.D

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá přesnými odlitky vyráběných metodou vytavitelného modelu. Hlavním cílem této práce je vytvořit přehled všech operací, materiálů a zařízení v technologii vytavitelného modelu. Na závěr obsahuje příklady aplikací v průmyslu.

Abstract:

This bachelor thesis deals with precision castings produced by investment casting process. The main objective of this thesis is to make list of all operations, materials and equipment which are used in investment technology. At the end, there are contained practical examples of applications in industry.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 27. května 2011

.....

František Ouzký

Foersterova 687

509 01 Nová Paka

Poděkování:

Rád bych poděkoval Ing. Ivě Novákové, Ph.D., za cenné rady a připomínky, které mi poskytla při psaní této bakalářské práce.

Obsah

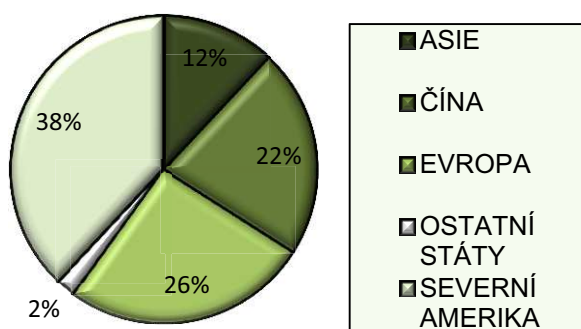
1. Úvod	7
2. Charakteristika technologie výroby odlitků metodou vytavitelného modelu	9
3. Výroba forem pomocí vytavitelného modelu	11
3.1 Voskový model	11
3.1.1 Druhy vosků	11
3.1.2 Formy pro výrobu voskového modelu	13
3.1.3 Plnění dutiny formy	17
3.1.4 Rapid prototyping	19
3.1.5 Sestavení modelové soustavy	21
3.2 Skořepinová forma	23
3.2.1 Materiály skořepinové formy	23
3.2.2 Postup výroby skořepinové formy	25
3.3 Vytavení voskové hmoty	27
3.4 Žihání skořepiny	28
4. Odlitek	29
4.1 Odlévané materiály	30
4.2 Tavení a odlévání materiálu	32
4.2.1 Tavicí pece	33
4.3 Dokončovací operace	34
4.4 Kontrola a detekce vad	35
4.4.1 Vady odlitků	36
4.5 Vlivy na kvalitu odlitku	37
4.5.1 Objemové změny voskové směsi	39
4.5.2 Objemové změny keramické formy	39
4.5.3 Objemové změny odlitků	39
5. Ukázky výroby odlitků na vytavitelný model	40
6. Závěr	44
7. Seznam použité literatury	46

1. Úvod

V současné době se u vyráběných dílů kladou čím dál vyšší požadavky na jejich rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu a to vše s ohledem na výrobní náklady. Jednou z metod výroby odlitků, která umožňuje výrobu součástí s co nejnižšími přídávky na obrábění, s hladkým povrchem a bez vnitřních vad, je metoda přesného lití na vytavitelný model.

Technologie vytavitelného modelu byla používána již Egypťany. Evropské počátky se datují do raného novověku. U nás se o zavedení a následný rozvoj této metody nejvíce přičinil Dr. Ing. Josef Doškář. První speciální slévárna na vytavitelný model s výkonem 250 tun ročně byla postavená v roce 1957 ve Zlíně. [19]

Světový prodej odlitků vyrobených technologií vytavitelného modelu dosáhl v roce 2009 8900 mil. USD, v předchozím roce byl tento prodej vyšší, tj. cca 10500 mil. USD. Důvodem poklesu prodeje byla ekonomická krize, která zasáhla i slévárenství. Nejvíce postižený byl automobilový průmysl. V současnosti celosvětový prodej přesných odlitků tak dosahuje úrovně z roku 2006, přesto je tato technologie velmi progresivní a perspektivní. Z grafu na obrázku 1. je patrný, že největší podíl na trhu ve výrobě odlitků přesným litím zaujímá Severní Amerika, následuje Evropa a Čína. [2], [3]



Obr. 1 Výroba přesných odlitků ve světě podle jejich prodeje [3]

Charakteristickým znakem této technologie je netrvalá keramická forma vrstvená na povrch voskového modelu, který se před odlitím kovu vytaví.

Litím na vytavitelný model lze vyrábět odlitky ze široké škály slévárenských materiálů, za určitých technologických podmínek lze odlévat i speciální materiály různých vlastností.

Touto technologií se vyrábí odlitky pro energetický průmysl, typickým produktem jsou lopatky plynových turbín. Výroba lopatek jinou metodou by byla velmi náročná a neekonomická. Tato metoda je využívána i pro výrobu odlitků v leteckém průmyslu, při výrobě proudových motorů a jiných dílů, dále v automobilovém průmyslu při výrobě komponent turbodmychadel, částí výfuků, přírub a částí motorů. Technologie vytavitelného modelu však disponuje velmi širokým využitím i pro aplikace v jiných sektorech průmyslové výroby, např. zbrojní průmysl, zemědělská technika, hydraulické a pneumatické komponenty, příslušenství lodí, atd. Přesné odlitky se vyrábí i pro medicínské účely, např. laboratorní nástroje, implantáty ve stomatologii, náhrady kloubů v chirurgii a ortopedické pomůcky. Velmi důležitým sektorem je i průmysl s komerčními odlitky, takto se odlévají např. hlavy golfových holí, šperky a bižuterie, hudební nástroje apod.

Problematikou výroby odlitků metodou vytavitelného modelu se zabývá i tato bakalářská práce. Práce shrnuje současné poznatky o této technologii, tj. jsou zde rozebrány jednotlivé technologické postupy, dále jsou popsány možnosti výroby modelů a skořepin, vlastnosti použitých materiálů a možné aplikace této technologie v praxi.

2. Charakteristika technologie výroby odlitků metodou vytavitelného modelu

Výroba odlitků pomocí této technologie se skládá z několika po sobě jdoucích operací, jednotlivé navazující technologické kroky jsou na obr. 2.

Tato metoda je specifická voskovým modelem, na který je vytvořena nedělená keramická forma. Forma vzniká obalením celé voskové sestavy (odlitky, vtoková soustava, nálevka), tj. stromečku. [10]

Voskový model se ve většině případů vyrábí ručním nebo strojním vyplněním dutiny kovové formy voskem v tekutém, kašovitém nebo v plastickém stavu. Kovová forma pro výrobu modelů se vyrábí třískovým obráběním. Od kvality formy pro výrobu modelů se odvíjí jakost modelu a tím i hotového odlitku.

Takto vytvořené jednotlivé modely se spojují pomocí lepení nebo pájení do tzv. stromečků na centrální kůl, který tvoří vtokovou soustavu. Modely se připojí tak, aby formovací směs mohla kvalitně obalit voskový stromeček.

Nanášení formovací směsi na voskový stromeček probíhá ve vrstvách. Stromečky jsou smáčeny v tekutém pojivu a potom jsou zasypávány ostrivem. Jednotlivé vrstvy se za daných podmínek suší.

Dalším krokem je vytavení vosku z dutiny skořepiny. Vosky se vytavují v autoklávu nebo v peci. Keramická skořepina dilatuje ve srovnání s voskovým modelem podstatně méně, proto musí být dodržena správná rychlost vytavení vosku, aby nedošlo k jejímu poškození.

V této fázi výroby není skořepina dostatečně tvrdá a nemá potřebnou pevnost, proto projde procesem žíhání. Žíhání skořepiny slouží k převedení amorfní formy vazné vrstvičky SiO_2 na formu krystalickou. [6]

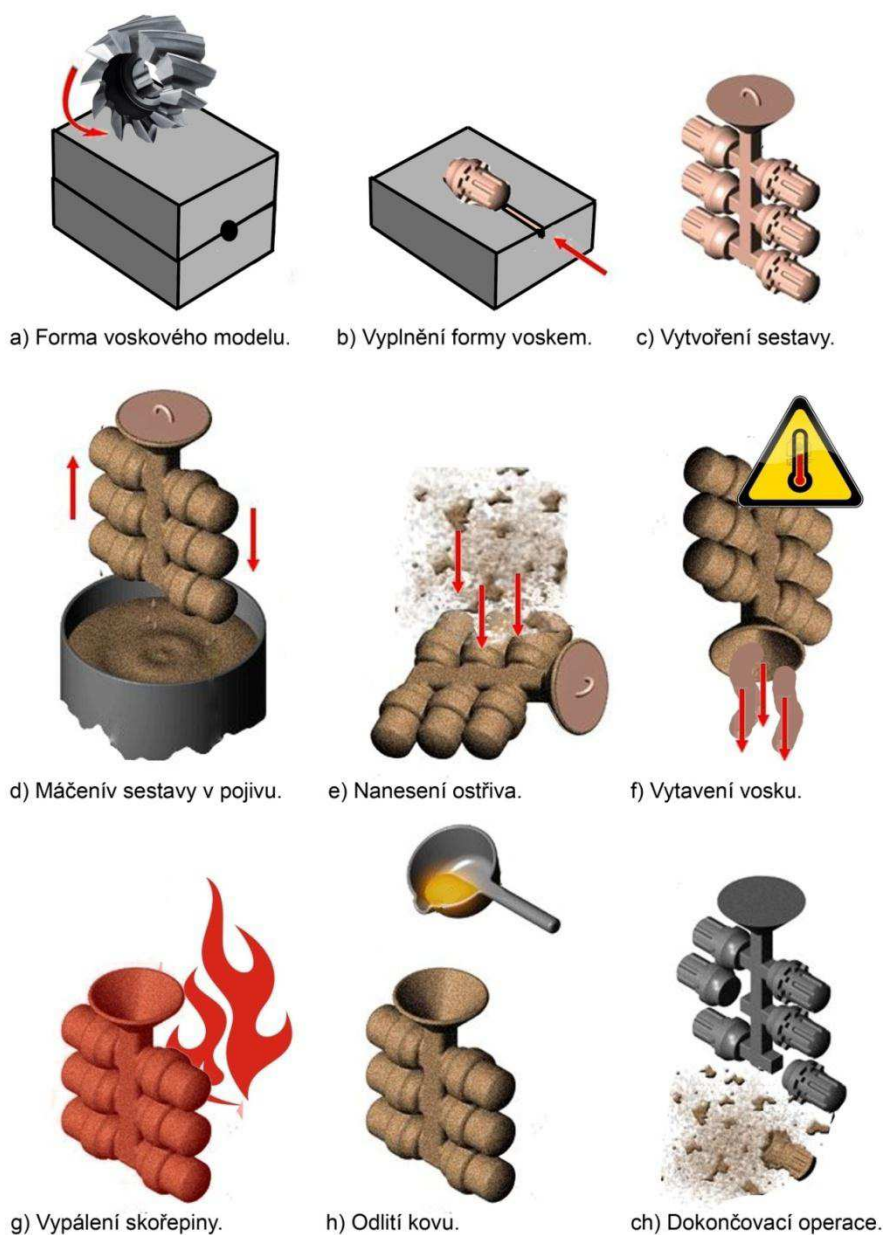
Do takto připravené skořepiny je možné odlévat. Teplota skořepiny při odlévání je závislá na odlévaném materiálu. Odlévání se provádí na vzduchu nebo vakuu, ve kterém je dosaženo lepších vlastností.

Po vychladnutí, které je závislé na tvaru, hmotnosti a odlévaném materiálu, ale i na materiálu formy, lze sestavu odlitků ze skořepiny vyjmout. Skořepina je velmi odolná, proto jsou účinné mechanické rázy a chemické čištění.

Sestava odlitků zbavena zbytků formy je dělena na jednotlivé odlitky. Podle jejich velikosti, je možné odlitky ulomit, urazit nebo odříznout.

Následují dokončovací postupy, které upravují výrobek do konečné podoby. Na odlitku se začistí stopy po vtoku. Někdy se plochy brousí, leští nebo lakují. Povrchových úprav je užito při požadavcích na ochranu a jakost povrchu.

Posledním krokem je kontrola jakosti vyrobených dílů. Část odlitků projde mechanickými nebo defektoskopickými zkouškami.



Obr. 2 Technologie metody vytavitelného modelu [27]

3. Výroba forem pomocí vytavitelného modelu

Forma pro budoucí odlitek by měla být navržena dle pravidel slévárenské technologie. Vtoková soustava bývá jednou z hlavních příčin různých vad odlitků, proto je nutná její optimalizace. Průřez vtokové soustavy musí být dostatečný, aby zajistil dokonalé vyplnění dutiny formy. Návrh vtokové soustavy je závislý na odlévaném materiálu, na velikosti a složitosti odlitku. Špatně navržená vtoková soustava zapříčiní nevhodnou plnicí rychlost. Při malé rychlosti plnění nedojde ke kvalitnímu vyplnění všech částí formy. Naopak velká rychlost plnění může formu poškodit, vzniká turbulentní proudění taveniny, povrch formy se vytrhává a mísí se do odlévaného materiálu. [1]

3.1 Voskový model

Pro samotnou výrobu keramické formy je nutný model. Model je z vosku a měl by mít požadovanou kvalitu tvaru a povrchu, dostatečnou tuhost, tvrdost a teplotní stálost. Model je potřeba navrhnout tak, aby se zabránilo vzniku tepelných uzlů. Měl by být opatřen úkosem nebo zaoblením umožňujícím snadné vyjímání z formy, které také zabrání poškození hran při manipulaci a obalování formovací směsí.

3.1.1 Druhy vosků

Voskové směsi pro výrobu modelů, běžně označované jako vosky, jsou složeny z mnoha komponent. Jednotlivé složky jsou voleny v poměru, který zajistí výhodné vlastnosti modelu. Poměrem složek lze ovlivnit vnitřní strukturu, která má vliv na tvrdost, viskozitu, bod tání, měknutí a skápnutí. Bod skápnutí se definuje teplotou, při níž skápne první kapka vosku z předepsaného teploměru. [4], [6]

V první řadě by vosková směs neměla reagovat s keramickou formou, ale její smáčivost v pojivu by měla být velmi dobrá. Stejně důležitými vlastnostmi je tečení voskové směsi a jejich objemová změna v závislosti na teplotě. Tato závislost je příčinou deformací modelů a popisuje ji kapitola 4.5.1.

Po modelu se požaduje dostatečná teplotní stálost, při manipulaci a vyjímání modelu z formy pro jeho výrobu by neměl měnit svůj tvar. To usnadňuje vosková směs, která má malou adhezi na stěny formy.

Vlastnosti voskové směsi jsou závislé na jejím složení a určují vhodnost jejich použití. Je rozdíl mezi směsí pro výrobu vlastních modelů a voskem pro výrobu vtokové soustavy. Například směs pro výrobu vtokové soustavy, která zpravidla přebírá funkce nosné konstrukce, musí mít dostatečnou tuhost. Další druhy voskových směsí jsou určeny pro ostatní operace, jako je oprava modelů nebo při kompletaci do stromečků.

Některé aplikace vyžadují zlepšení mechanických vlastností vosků, proto se kromě jejich kombinací používá přísad plastických hmot, které fungují jako plnivo modelové směsi. Plněné vosky mají zejména významně nižší smrštění. [4]

Základní složkou **přírodních modelových hmot** je vosk karnaubský, kalafuna, montánní vosk, včelí vosk, parafín a cerezín.

Karnaubský vosk je rostlinného původu. Ve voskových směsích je to nejtvrdší vysocerozpustná složka.

Borová kalafuna je další tvrdou složkou. Teplota měknutí kalafuny je nad 60°C.

Montánní vosk je hlavní voskovou složkou. Je to vosk, který rychle tuhne a má dobrou stabilitu. Extrahuje se z hnědého uhlí. Je velmi tvrdý a taje při 72°C až 77°C.

Včelí vosk je velmi plastický a oproti karnaubskému měkký.

Parafín je směs uhlovodíků z ropy s definovanou teplotou tání, která závisí na stupni jejich rafinace a pohybuje se v rozmezí 42°C až 64°C. Parafín je křehký a málo pevný.

Cerezín je směs tvrdých metanových uhlovodíků. Cerezín má oproti parafínu vyšší teplotu měknutí. Jeho nevýhodou je velké lineární smrštění a poměrně nízká pevnost. Například cerezín spolu s montánní pryskyřicí, hydro a monokarbidovou kyselinou tvoří směs, která velmi rychle tuhne. Proto se za použití kalafuny tato rychlost upravuje tak, aby nedošlo k popraskání modelu.

Voskové směsi syntetické obsahují pryskyřici, vosky, plnivo a polymery. Pryskyřice je amorfni látka, která se od vosků liší vyšší teplotou měknutí, tj. v intervalu od 25°C až 190°C.

Vosky se i při jejich nízké ceně, po vytavení z keramické formy, vrací do cyklu výroby. Z vosku se odfiltrují jednotlivé nečistoty speciálním sítem nebo textilií, další možností je odstranění částic zbytků keramiky a jiných nečistot odstředivým způsobem nebo jejich sedimentace na dno. Takto jsou ztráty objemu vosku v celém cyklu výroby modelu téměř nulové. Vosk by měl mít dlouhou životnost a možnost regenerace. [1], [6]

3.1.2 Formy pro výrobu voskového modelu

Pro výrobu voskového modelu je nutné zhotovit formu. Podle požadovaného množství a vlastností odlitků je technologem volen způsob výroby formy, její materiál i materiál zakládáných jader.

Samozřejmostí při konstrukci a výrobě formy je důraz na přesnost rozměrů a jakost povrchu, kterou bude mít voskový model a tím i výsledný odlitek. Formy jsou dle násobnosti určeny pro výrobu jednoho nebo více modelů. Formy mohou být i kombinované, které zahrnují jak samotné modely, tak vtokové soustavy.

Důležitou vlastností materiálu těchto forem je především rozměrová stálost při teplotách, kterým jsou vystaveny při vstřikování vosků. Ve finálních rozměrech forem jsou zahrnuty objemové změny vosku. Při výrobě forem dle matečného modelu jsou objemové změny vosku zahrnuty právě v jejich matečném modelu. [1]

Vzhledem k tomu, že formy pro výrobu voskových modelů nejsou vystavovány tak velkému mechanickému namáhání jako např. při tlakovém lití neželezných kovů, nedochází k jejich velkému opotřebení, ani vytrhávání a poškozování povrchů vlivem adhezních sil při napalování materiálu. Proto lze z hlediska materiálů k výrobě těchto forem použít při malém množství vyráběných kusů plastické hmoty, sádry, silikonové pryskyřice nebo pro trvanlivější formy ocel, mosaz, bronz, hliník a jeho slitiny. Ocel není citlivá na deformaci a opotřebení, zvláště na hranách, lze ji dobře svařovat, tudíž se dobře opravuje. Hliník a jeho slitiny mají oproti oceli nižší hustotu. Nespornou

výhodou hliníku a jeho slitin je jejich tepelná vodivost, která zajistí rychlé chlazení modelů v dutině formy.

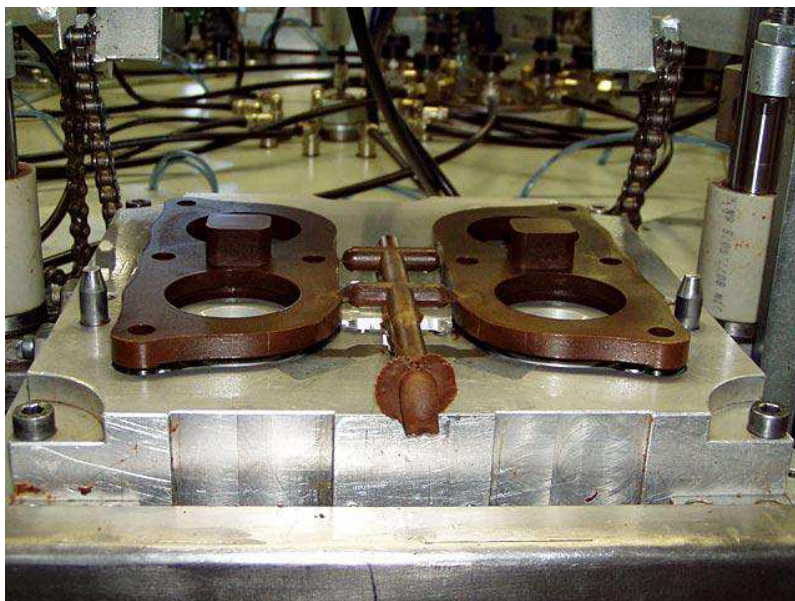
Pro výrobu dutin komplikovaného tvaru a kvalitních děl, u kterých v některých případech formovací směs špatně nebo vůbec dutinu nevyplní a vlivem velkého nahromadění materiálu by nedošlo k proschnutí, se používají keramická jádra, která se zakládají do formy pro výrobu voskového modelu. Voskem zastříknutá jádra se později stávají součástí keramické formy. Jádra, mohou být ve formě jednoduchých tyčinek, profilů, ale mohou být i tvarově složitá, viz obr. 3. [6], [9]



Obr. 3 Ukázka keramických jader [9]

Při výrobě forem se užívají dvě odlišné metody. Nejčastěji to jsou kovové formy, které mají dobré mechanické vlastnosti a velkou životnost, které se vyrábí třískovým obráběním. Druhou možností je výroba forem dle matečného modelu. [1]

Výroba formy technologií třískového obrábění umožní vyrobit formy s vysokou rozměrovou přesností, kvalitou povrchu a životností, na druhé straně ale s vysokými náklady. Touto technologií lze vyrábět formy dle složitosti od jednoduchých až po tvarově složitě s velkým počtem dílů. Vzhledem k rostoucí tvarové složitosti vyráběných dílů je do výroby forem zaváděna cad/cam podpora a obráběcí centra. Na obr. 4 je ukázka hliníkové formy vyrobené touto technologií.



Obr. 4 Forma z hliníkové slitiny - v dutině je tlakově odlit model [8]

Výroba formy dle matečného modelu je technologie, při které je na matečný model nanášen požadovaný materiál formy. Formy pro výrobu voskových modelů vyráběné touto metodou mají kvalitní povrch a přesné rozměry, jejich nevýhoda spočívá v menší životnosti (jednotky až tisíce kusů), protože se rychleji opotřebovávají nebo deformují. Pro menší série je tato technologie vhodná vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům obrábění formy a také je jejich výroba výrazně rychlejší. Používají se k ověřování postupů a z velké části pro malé série umělecké výroby.

První metodou je **výroba formy zalitím modelu sádrou, epoxidovou pryskyřicí** (pro zvýšení životnosti se přidává jako plnivo kovový prášek) **nebo dentakrylem**. Je to velmi nenáročná a levná metoda, ale bez nároku na jakoukoliv přesnost a kvalitu povrchu. Její využití je zejména při výrobě jednotlivých kusů nebo malých sérií. Slouží pro výrobu prototypů a uměleckých odlitků.

Obdobou metodou je **výroba z pružného silikonového kaučuku**, jehož výhodou je poddajnost při vyjímání voskových modelů. To umožňuje vytváření komplikovaných tvarů rychlým způsobem. Bohužel se nesmí klást nároky na rozměrovou přesnost.

Vyšší přesnosti se dosáhne při výrobě **formy z nízkotavitelných slitin**. Jsou to slitiny složek vizmut, olovo, cín, kadmium a antimon, kterým lze jejich různým poměrem měnit vlastnosti. Část matečného modelu se

zali je slitinou ve výztužných ocelových rámech, takto se vytvoří jedna polovina formy. Druhá polovina se vytvoří zalitím zbylé části modelu slitinou o nižší teplotě tání. Díky rozdílným teplotám tavení lze poloviny formy oddělit a provrtat pro jednoznačné sesazení forem. Formy mají malou životnost, ale vyhovující rozměrové a povrchové kvality. [1], [6]

Jinou technologií výroby z nízkotavitelných slitin je lisování. Dutina formy se vytvoří vtlačením razníku do slitiny. Razník je tvaru budoucího odlitku. [1]

Ve výrobě, kde je potřeba větší počet odlitků se uplatňuje **galvanoplastická metoda a forma vyrobená metalizováním**.

Galvanoplastickou metodou se formy vyrobí tak, že se v galvanické lázni vytvoří niklová nebo měděná skořepina na matečném modelu, který je z kovů, plastů nebo vosků. Důležité je snadné vyjmutí tohoto modelu ze skořepiny. Lze tak vyrobit i povrch se složitým desénem kůže, textilií, dřeva nebo jemných nápisů. Tloušťka stěny formy se pohybuje jen do 5 mm, proto se vyztužuje. Takto vyrobené formy vydrží až 170000 odstřiků vosku, jejich výroba je však náročná, trvá dlouho a vyžaduje speciální zařízení. Ukázka takto vyrobené formy je uvedena na obr. 5. [1], [12], [13]



Obr. 5 Galvanoplastická vložka formy [13]

Druhá metoda, která umožňuje výrobu forem s vysokou životností, až 100000 vstříků, je výroba metalizací. Tato metoda spočívá ve stříkání natavených kovových částech z pistole na model. Natavování zajistí oblouk nebo plamen. Jednotlivé kapičky se spojují v homogenní jednolitou vrstvu i po složitém a velmi komplikovaném povrchu. Vrstva je velmi tvrdá a odolná, ale velmi tenká, proto se vyztužuje plněnou epoxidovou pryskyřicí. [1], [6]

3.1.3 Plnění dutiny formy

Dutina formy musí být před vyplněním voskem vyčištěna a její líc je opatřen separačním prostředkem. Vosk je do dutiny formy plněn gravitačním litím nebo vstříknut pod tlakem.

Gravitační lití vosku je méně využívaný způsob. Tato metoda je využívána zejména pro kusovou výrobu nebo pro modely vtokových soustav a náliťků. Takto vyrobené modely mají dlouhé doby tuhnutí, dochází ke špatnému odvodu tepla při chladnutí a při plnění formy se vosk musí dotlačit pístem nebo kuželem.

U **strojního plnění dutiny formy** je vosk vstříknut pod tlakem do dutiny formy speciálními vstřikovacími lisami různých konstrukcí, viz obr. 6. Uzavírací síla je u největších lisů až 300 tun a maximální tlak vstřikování dosahuje až 100 bar. Základem lisu je tuhý rám, vosk se vtlačuje do dutiny formy ze vstřikovací komory a je doplňován ze zásobníku, jehož ohřívací jednotka by měla být schopna udržet požadovanou teplotu. [6], [11]

Kvalita modelů se zlepšuje parametry vstřikování, proto teplota, tlak, doba a velikost dotlaku jsou programovatelné. Plněním za nižšího tlaku dosahuje model velmi kvalitních povrchů, ale jeho rozměry nejsou přesné. Naopak při vysokém tlaku má model relativně horší povrch, ale přesné rozměry. Také automatizací procesu se zlepšuje kvalita i produktivita, klesá tak podíl pracovních sil na minimum. Například efektivním způsobem je vstřikování do forem umístěných na karuselovém otočném stole. [4], [6]

Kromě vstřikování tekutého vosku se ve slévárnách používají vstřikovací stroje, které pracují s jiným skupenstvím. Voskové směsi se vstřikují v kašovitém nebo pevném stavu, to zlepšuje jejich chování. Hlavní podmínkou je konstantní teplota vosku v celém stroji bez ohledu na skupenství vosku.



Obr. 6 Vstřikovací lisy různých konstrukcí pro voskové směsi [11]

Vstřikování vosku v tekutém stavu je velmi výhodné, umožňuje čerpání vosku z centrálního zásobníku. Nevýhodou zůstává delší pracovní cyklus v důsledku chlazení z vyšší teploty. Směs je tavená v zásobníku elektricky. Při tavení je teplota udržovaná ve všech místech konstantní pomocí míchače. Dále se vosk přivede do pracovní tlakové komory stroje. Vosk je po vstříknutí do dutiny formy, která se uzavře pneumaticky, dotlačován po určitou dobu, čímž se koriguje objemová změna a zabrání se vadám na odlitém modelu (staženinám). Doba vstřikování a dotlaku rozhoduje o kvalitě modelu. Také rychlost je zásadním faktorem, měla by být co nejvyšší, aby došlo k dokonalému vyplnění formy, ale nesmí vznikat turbulentní proudění. [6]

Vstřikování vosku v kašovitém stavu je velmi výhodné z hlediska objemových změn. Plnění dutiny formy vyžaduje přítomnost zařízení, které ho udržuje na určité teplotě. Je nutný míchač, který promíchává tekuté a tuhé fáze do kašovitě hmoty. Při vstříknutí tímto způsobem modely rychleji tuhnou a nemají tak velké objemové změny, protože vyšší teplota znamená větší rozměrové smrštění při tuhnutí. [6]

Tato výhoda je ještě umocněna **plněním dutiny tuhou fází**. Vosk je protlačen skrze trysku do dutiny formy. Vosková směs musí být přehřátá, ale tak aby nedošlo ke změně skupenství. Roztažnosti vosků jsou vysoké a

nejprudší změny nastávají při změně skupenství, proto je v případě tuhých fází výhoda v menších rozměrových změnách. [6]

3.1.4 Rapid prototyping

Výroba modelu (formy) klasickými technologiemi je velmi pracná a zdoluhavá. V některých případech je nutné v krátkém čase vyrobit prototyp, nebo malý počet modelů, popřípadě navrženou formu ověřit v praxi. V těchto případech se využívá technologie Rapid prototyping.

Metoda spočívá ve vytvoření modelu z dat počítačového programu pomocí strojů, obecně nazývaných „3D tiskárny“. Rapidová technologie funguje na principu přidávání materiálu po vrstvách na rozdíl od obrábění, kdy se materiál odebírá. V programu se vytvoří 3D model, který je programem rozdělen na jednotlivé vrstvy. Ty jsou velmi tenké a jsou zařízením sestaveny ve fyzický model. Tímto způsobem se mohou vyrobit i tvarově velmi složité součásti s velkou přesností (řádově setiny milimetru), viz obr. 7. Tuto technologii lze využít pro výrobu voskového modelu, funkčního vzorku, prototypu nebo matečného modelu. V případě metody spékání kovových částic lze vyrobit formu pro výrobu voskového modelu.



Obr. 7 Model vytvořený technologií rapid prototyping a jeho odlitek [16]

Jednou z technologií rapid prototyping je **Multi jet modeling**. Princip této metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev speciálního polymeru, vosku, nebo titanu postupně na sebe pomocí speciální tiskové pracovní hlavy. Materiál ve formě prášku, je odebírán ze zásobníku a přehříván. Tiskovou hlavu tvoří soustava trysek. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený materiál ztuhne při styku s už nanesenou vrstvou téměř okamžitě. Tyto zařízení se řadí mezi jedny z nejrychlejších se současně nejnižšími provozními i pořizovacími náklady na trhu. [29], [30]

Této technologii je velmi podobný způsob **Fused deposition modeling**, kde jsou obdobně nanášené vrstvy roztaveného materiálu. Ten je přiveden to trysky ve formě drátu. Je taven jen málo nad teplotu tání. Materiál po kontaktu s povrchem rychle tuhne. [29], [30]

Nejvýznamnější technologie Rapid Prototyping je **Stereolitografie**. Materiálem využívaným stereolitografií je fotopolymer, který je vytvrzován ve vrstvách UV laserem v pracovní komoře. Zde se pohybuje podložka a nůž zajišťující rovinu v každé vrstvě. Řídící jednotka obsahuje počítač, který ovládá celý stroj. Stavba modelu je založena na postupném vykreslování vrstev na hladinu polymeru laserem, který je na základě systémových dat zaměřován optickou soustavou. V místě dopadu paprsku je pryskyřice vytvrzena a podložka se posune o vrstvu směrem dolů. Vytvrzením vrstev vzniká trojrozměrný model. Stereolitografie vyniká dobrou přesností a součástka, která by se klasickými konvenčními metodami vyráběla několik týdnů, může být vyrobena během několika hodin. [29], [30]

Selective laser sintering je technologie, při které je laserovým paprskem spékán do určitého tvaru plastový nebo kovový prášek (lze využít jakýkoliv prášek, který se působením tepla taví). Zahřátý prášek je nanášen po vrstvách pomocí speciálních válců. Každá jednotlivá vrstva je v ochranné atmosféře vytvrzena CO₂ laserem. Podle souřadnic je veden laserový paprsek a v místě působení se prášek speče. Nespečený materiál slouží jako nosná konstrukce. Modely vzniklé spékáním kovových prášků jsou velmi pevné a dosahují dostatečných mechanických vlastností. [29], [30]

3.1.5 Sestavení modelové soustavy

Technologie výroby odlitků metodou vytavitelného modelu se zefektivňuje sestavováním více modelů do jednoho celku. Na model vtokové soustavy se připojují jednotlivé modely. Součástí je i zalité madlo, které slouží pro lepší manipulaci.

Takto vytvořené sestavy jsou ekonomicky výhodné, protože se při jednom odlévání vyrobí více odlitků. Kromě úspory časové, není nutné zvlášť tavit a udržovat taveninu, což je zvláště energeticky náročné u hliníku a jeho slitin. Jednotlivě se touto metodou odlévají pouze objemné, umělecké a prototypové odlitky. [1]

Nevýhody spočívají ve velké pracnosti při sestavování stromečků. Samotné rozložení a vzdálenosti jednotlivých modelů ve stromečku ovlivňují kvalitu budoucího odlitku. Rozložení se volí tak, aby odlitky bylo možné oddělit jednoduše a s dobrým přístupem. Velká vzdálenost modelů zabraňuje kvalitně vyplnit dutinu formy taveninou, protože ta tuhne dříve, než ji stačí vyplnit. Naopak hustá sestava zabraňuje kvalitnímu obalení modelů formovací směsí. Modely musí být sestaveny tak, aby při vytavování vosku došlo k dokonalému vyprázdnění dutiny skořepiny. V případě špatného odvodu vosku z dutiny formy se přidávají výtokové otvory. [6]

Před sestavením modelů do sestavy, tzv. stromečku, je nutné vyrobené modely připravit pro další manipulaci. Model se nechá minimálně několik hodin stabilizovat a před dalším procesem se jednotlivé voskové modely čistí od vtoků a přebytečného materiálu (např. vzniklým špatným lícováním formy v dělicí rovině). Vtoky a přetoky se mohou z modelu odlomit nebo odříznout. Při odlamování hrozí nebezpečí poškození zalomením do modelu, které se musí opravit, stejně jako jiné drobné oděrky a deformace způsobené nevhodnou manipulací. Největší pozornost je nutné věnovat změně tvarů vlivem tepelného působení okolí, neboť i nepatrné změny mají za následek vznik špatné skořepiny a později i odlitku. [4]

Jednotlivé díly celé soustavy se k sobě připojují **pájením, lepením, zasunováním nebo zaléváním**. Jednotlivé modely lze ke vtokové soustavě pájet, viz obr. 8. U této metody se zahřátá pájecí hlavice vloží mezi připojovaný model a vtokovou soustavu. V okamžiku, kdy je model i vtok nataven, se pájecí hlavice vytáhne a obě části se k sobě přitlačí. [6], [10]

Dalším možným způsobem vytvoření stromečku je lepení. Při lepení je využito směsi z přehřáté sloučeniny pryskyřice, parafínu a asfaltu. Směs je v udržovací pistolí, ze které je aplikována na spojované plochy a tím je vytvořen kvalitní spoj mezi vtokem a modelem. [1]

Při spojování jednotlivých částí je také možné vytvořit otvory na vtokové soustavě, do které se zasune model s předlžitým kolíkem. Tyto spoje nevykazují nejvyšší pevnost, proto se proti pootočení lepí nebo zatavují. [1]

Další možností je metoda zalévání, která poskytne jednoznačné a pevné uložení modelů ke vtokové soustavě. Modely jsou založeny kolíky nebo vtoky do formy pro výrobu vtokové soustavy, která se postupně vyplňuje voskovou směsí a tak vznikne zatuhlá etážová část modelové soustavy. [1]



Obr. 8 Pájení modelu k sestavě [8]

Po dokončení sestavování stromečků je nutné, před dalším zpracováním, zajistit kvalitní skladování. Většina moderních sléváren je vybavena klimatizačními jednotkami, které drží teploty ve skladovacích a manipulačních prostorech maximálně na hranici, která zaručí, aby se hotové modely vlivem teplot nedeformovaly.

3.2 Skořepinová forma

Při výrobě odlitků metodou vytavitelného modelu je vyrobena jednoduchá, netrvalá forma, tzv. skořepina. Je určena jen pro jedno odlití.

Skořepina se vytvoří postupným vrstvením formovacích materiálů na povrch sestavených voskových stromečků. Velmi důležité je složení formovací směsi a kvalita jejího nanášení. Vlivem špatného obalení může dojít k oslabení konstrukce formy nebo zhoršení vlastností skořepin.

Skořepina, kterou tvoří keramická břečka a ostrivo musí dokonale reprodukovat povrch a tvar modelové sestavy a nesmí reagovat s modely ani s odlévaným materiálem. Její vnitřní povrch by měl být hladký s malou pórovitostí. Skořepina dále musí mít dobré mechanické vlastnosti, aby udržela tlak litého kovu, nízkou objemovou roztažnost, dobrou tepelnou vodivost a odolnost proti teplotním rázům. Tepelnou vodivostí je ovlivněna rychlost přenosu tepla z odlitku do formy. [4], [5]

Na konci „formovacího procesu“ je voskový stromeček vytaven, skořepina vypálena a po ztuhnutí odlitého kovu z odlitku odstraněna.

Slévárny jsou neustále nuceny ke snižování svých výrobních nákladů, výrobě malých sérií a složitých tvarů. Klasický způsob návrhu formy a technologie se dá dobře aplikovat u jednoduchých odlitků, ale u složitějších může vývoj trvat velmi dlouho. V současné slévárenské praxi se poměrně běžně využívají **simulační programy**. Tyto programy simulují procesy uvnitř formy, tj. plnění dutiny formy, průběh tuhnutí a chladnutí odlévaného materiálu a predikují případné vady odlitků. Lze tak dynamicky reagovat na nežádoucí jevy již ve fázi vývoje forem.

3.2.1 Materiály skořepinové formy

Formovací materiál pro výrobu skořepin vyráběných metodou vytavitelného modelu je složen z ostriva a pojiva (kašovitě formovací směsi - břečky tvořené vaznou kapalinou a plnivem).

Jako pojiva formovacích hmot na skořepinové formy se používají především **koloidní roztoky oxidu křemičitého**, dále také organické sloučeniny hliníku, titanu, zirkonu a některé sloučeniny anorganické. [6]

Základní pojivové systémy křemičitanových pojiv jsou hydrosoly a alkosoly. Pro svou vyšší pevnost a nižší sklon k praskání se používají pro

primární obal převážně hydrosoly. Hydrosoly mají delší dobu schnutí, protože jsou na vodní bázi, sušení probíhá na vzduchu. Alkosoly vysychají a vytvrzují se rychleji než pojiva na vodní bázi. Vytvrzují se působením plynného prostředí – amoniakem. Alkosoly se používají hlavně pro sekundární obaly, protože díky jejich rychlému vytvrzování lze vrstvy opakovaně nanášet již po několika minutách. Spojení jednotlivých zrn plniva do pevné skořepiny dochází při gelaci pojiva. Gelace vzniká při vysychání koloidních roztoků, na jednotlivých zrnech plniva vznikne vrstvička amorfního SiO_2 , která silně lepí. [4], [1]

Koloidní roztoky oxidu křemičitého jsou nejčastěji etylsilikáty s obsahem křemíku kolem 40%. Do koloidního roztoku lze převést téměř všechny látky. Etylsilikát vzniká při působení plynného chlóru na žhavý křemík, vznikne jejich tekutá sloučenina. Ve styku s vodným alkoholem ztrácí tato tekutina chlór a mění se ve složitou kapalnou sloučeninu. Rozpouštěním etylsilikátu v alkoholu, s přidavkem mírně okyselené vody, vznikne jemný oxid křemičitý koloidně rozpuštěný. [1], [6], [23]

Keramické plnivo v břečce a ostřivo jsou žáruvzdorné materiály, které mohou být stejného chemického složení, lišící se jen granulometrií. Tyto materiály jsou určeny druhem odlévaného kovu. Na výrobu skořepin se jako žáruvzdorné materiály používají hlavně **oxidy a křemičitany**, uvedené v tab. 1. Pro praktické průmyslové použití se z oxidů využívá především oxid křemičitý, hlinitý a zirkoničitý. Z křemičitanů se využívá nejvíce mulitu, zirkonu a hlavně molochitu. Molochit je mullit ve sklovité obálce amorfního oxidu křemičitého.

Nanášením ostřiva se urychluje sušení a zmírňuje se stékání břečky. Tyto jemnozrnné posypy rozhodují o kvalitě povrchu formy. Zrnitosti primárních vrstev jsou od 0,1 mm do 0,25 mm, pro následné vrstvy je zrnitost do 0,50 mm. Ostřivo je materiál s vysokou teplotou tavení, která by měla být vyšší než teplota, při které se odlévá. [4], [23]

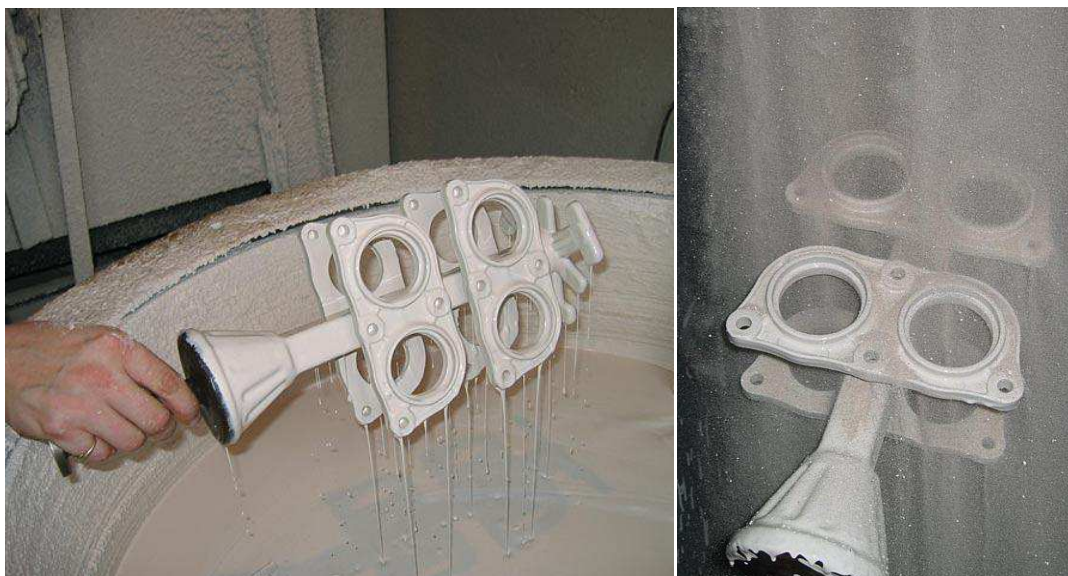
Tab. 1 Přehled ostřiv formovací směsi

Název ostřiva	Chemické složení
Oxid křemičitý	SiO ₂
Oxid zirkoničitý	ZrO ₂
Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃
Křemičitan zirkoničitý	ZrSiO ₄
Mulit - aluminosilikát	3Al ₂ O ₃ *2SiO ₂
Molochit	Mulit (56%), oxid křemičitý (44%)

3.2.2 Postup výroby skořepinové formy

Před samotným vytvořením skořepinové formy je nutné modelovou sestavu odmastit, aby k ní formovací směs dobře přilnula.

První vrstvou formy je keramická břěčka, ve které se modelová soustava máčí. Při smáčení, viz obr. 9, se ve vazné kapalině musí důkladně celou soustavou pohybovat, aby veškeré vzduchové bubliny, které lpí na povrchu a v záhybech unikly. Keramická břěčka musí mít při namáčení takovou hustotu a vlastnosti, aby neporušila voskový stromeček. Také po smáčení je nutné se stromečkem manipulovat tak, aby se vytvořila rovnoměrná vrstva. Následně je stromeček vložen do bubnu, ve kterém jsou fluidně rozvířené částice ostřiva, které jsou naneseny na vrstvu břěčky. Ostřivo lze také aplikovat sypáním, viz obr. 9, nejčastěji v sypacích, z jehož zásobníku jsou rovnoměrně troušeny posypové částice na rotující voskový stromeček. Přebytný posyp je vrácen zpět do zásobníku. Počet nanášených vrstev formovacího materiálu je dán velikostí odlitku. Skořepiny pro odlitky o nižší hmotnosti jsou zatěžovány méně, než skořepiny pro rozměrnější odlitky, proto se obalují nižším počtem vrstev. [1], [6]



Obr. 9 Máčení v pojivu, následné posypání ostřivem [8]

Před aplikací dalších vrstev formovací směsi je nejprve nutné poslední přidanou vrstvu důkladně prosušit. Nedosušená vrstva se může následným obalením poškodit. Jednotlivé formy se suší v klimatizovaném prostředí do 25°C. Obalené stromečky se zavěsí na dopravníkový mechanismus, který je po celém prostoru klimatizované místnosti. Vysychání obalených stromečků je urychleno prouděním vzduchu. Pokud slévárna nevlastní klimatizační místnost probíhá sušení v sušičkách. Průměrná doba sušení vlivem moderních technologií trvá několik minut, ale v obvyklých případech a ve starších slévárnách od jedné do pěti hodin. Značný vliv na dobu sušení má složitost modelu. Jednoduché a malé stromečky mají kratší dobu schnutí, naopak větší model s velkým členěním povrchu má vlivem špatného pohybu vzduchu v záhybech dobu sušení delší. V záhybech se také důsledkem stékání hromadí větší vrstvy obalového materiálu, který déle schne. [1], [6]

V malých slévárnách a při kusové výrobě se tyto činnosti provádí ručně, ve velkých slévárnách nebo při sériové výrobě se zavádí automatizace. Do jednotlivých pracovišť jsou instalováni roboti, kteří zaručí jednak vyšší produktivitu a jednak výrobu každé skořepiny za konstantních podmínek (každý stromeček bude obalován totožnou rychlostí, po stejnou dobu a stejným směrem pohybu). To umožní firmě garantovat kvalitu výroby.

Druhou metodou výroby keramických forem je **výroba forem bezobalovým způsobem**. U této metody vznikne pevná forma zalitím

kašovitě formovací směsi do rámu. Formovací směs se zhutní střešáním, po určité době ztuhne, forma se usuší, model vytaví a forma vypálí. Tato metoda je přesnější, forma díky své pevnosti není náchylná na deformaci, ale má vyšší výrobní náklady, dlouhou dobu výroby a obtížné vytloukání odlitků. Forma zhotovená touto metodou je vhodná pro odlévání objemných a těžkých odlitků. [1]

Součástí výroby skořepinové formy je její kontrola. Formy se kontrolují nejen opticky, ale i každá jednotlivá složka materiálu formy a samotný postup při výrobě. Ve výrobním procesu pojiva (keramické břčky) stárnou, dochází ke zvyšování její koncentrace, čímž se zvyšuje její hustota a mění se její vlastnosti a schopnosti reprodukovat model. U ostřiva se kontroluje jeho zrnitost. [1]

3.3 Vytavení voskové hmoty

Forma vytvořená nanesením formovací směsi na voskový stromeček je po dokonalém vysušení k odlití kovu ještě nevhodná. V dutině skořepiny se stále nachází voskový stromeček, který je nutné vytavit.

Vosky se vytavují ve vroucí vodě, v autoklávu, dielektrickým ohřevem, proudem teplého vzduchu, popř. v pecích. Základem je vytvoření dostatečné teploty během krátké doby, aby se vytvořila vrstva tekutého vosku na hranici keramické formy a modelu, tím se zabrání popraskání keramické formy (rozdíl mezi roztažností formy a modelu). [4]

Vytavení vosku v autoklávu se provádí přehřátou párou o teplotě cca 135°C až 165°C a tlaku cca 0,3 – 0,6 MPa. [4]

Za nižších teplot se vosk vytavuje dielektrickým ohřevem. Skořepina se navlhčí a je vložena do pole vysokofrekvenční oscilace, kde dojde k rychlému ohřevu. [4]

Dalším způsobem vytavení vosku je vytavení proudem horkého vzduchu na střed voskového modelu. Proud vzduchu se rychle protaví celým modelem dříve než se ohřeje celý objem vosku, který by svým roztažením poškodil formu. [4], [6]

Vytavení modelu také umožňují žíhací pece. Vosky jsou vytaveny a skořepina je následně vyžíhána. Nevýhodou je znehodnocení určitého množství vosku, výhodou je přímé vyžíhání skořepiny.

Po vytavení vosku skořepina nemá dostatečnou pevnost, tvrdost a její dutina je znečištěna zbytky vosku, proto je nutné její tepelné zpracování.

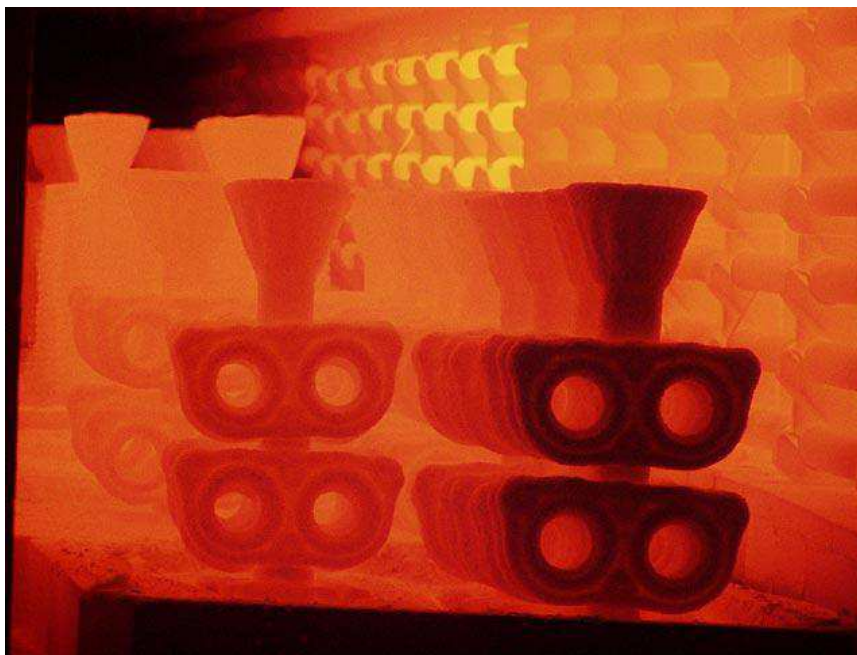
3.4 Žíhání skořepiny

Aby skořepina vydržela tlak odlitého kovu, měla by mít dostatečnou pevnost. Pevnost forma získá tepelným zpracováním za vysokých teplot, kdy dojde ke krystalografické přeměně amorfního SiO_2 na krystalický. [4]

Forma je vložena do pece pro tepelné zpracování, viz obr. 10. Ohřívání skořepin v peci musí probíhat plynule, aby se tak zabránilo jejich popraskání. Při zahřívání se z forem odpařují zbytky alkoholu a vody. Jedním z důvodů žíhání forem je i vypálení zbytkového vosku, proto je do pecí přiváděn kyslík. Teplota žíhání bývá v rozmezí 900°C až 1100°C (pro SiO_2), pro molochit, korund aj. jsou teploty vyšší, okolo 1200°C až 1400°C . Při odlévání slitin s nízkým bodem tavení je teplota vypalování nižší, pohybuje se pod 850°C . [4], [6]

Ve slévárnách pro velkosériovou výrobu jsou skořepiny tepelně zpracovávány v průběžných pecích, kde jsou skořepiny umístěny na pojezdech s kolejovým vedením. Pro menší série jsou využívány elektrické odporové pece komorové. Výhoda elektrických odporových pecí spočívá v kontrolovatelnosti atmosféry, která je nutná pro dokonalé spálení zbytků vosků. K odstranění zuhelnatělého vosku je potřeba kyslík, který je přiváděn do pecního prostoru pomocí ventilace. Mnohem obtížnější je dosažení požadované úrovně kyslíku u plynových pecí, protože plynový hořák má tendenci volný kyslík pohltit. [1], [6], [8]

Po vyžíhání keramické formy je odvedeno mnoho hodin práce. Skořepiny se snadno poškodí, jejich poškození je neopravitelné a proto se manipulaci s formami musí věnovat pozornost.



Obr. 10 Žihání skořepiny [8]

4. Odlitek

Technologickým produktem metody vytavitelného modelu je přesný odlitek. Ve výrobě lze dosáhnout užších rozměrových i tvarových tolerancí v závislosti na jmenovitém rozměru. Menší odlitky lze vyrobit dle 13. stupně přesnosti, v některých případech, kdy je požadována lepší rozměrová přesnost, lze vyrábět odlitky dle 12. stupně přesnosti, viz tab. 2. [1]

Tab. 2 Rozměrová přesnost odlitků [1]

Jmenovitý rozměr, mm	Dovolené úchytky rozměrů, mm	
	IT 13	IT 12
0 - 3	$\pm 0,07$	$\pm 0,045$
3,1 - 6	$\pm 0,09$	$\pm 0,060$
6,1 - 10	$\pm 0,11$	$\pm 0,075$
10,1 - 18	$\pm 0,14$	$\pm 0,090$
18,1 - 30	$\pm 0,16$	$\pm 0,105$
30,1 - 50	$\pm 0,19$	$\pm 0,125$
50,1 - 80	$\pm 0,23$	$\pm 0,150$
80,1 - 120	$\pm 0,27$	$\pm 0,175$

Drsnosti povrchu jsou v rozmezí Ra 3,2 a Ra 6,3.

Minimální tloušťka stěny při lití slitin železných kovů je 0,5 mm, u slitin neželezných kovů je to 0,3 mm. Odlitky mohou dosahovat až 200 kg a velikosti 1000 mm, běžně se vyrábí menší odlitky o hmotnosti do 50 kg. [4]

Odlitky je možno konstruovat s řadou výztuh, vylehčení, otvorů, žeber, kolíků a negativních úkosů. Často lze skládat do jednoho odlitku několik strojních součástí, které byly dříve spojovány svařováním, pájením, nýtováním, příp. rozebíratelnými spoji.

U součástí vyráběných obráběním musí konstruktér sledovat technickou vyrobiteľnost. Z těchto důvodů obvykle upouští od vylehčení součástí. Výroba tvarově složitějšího profilu je pro obrábění příliš pracná a nákladná, mnohdy vyžaduje speciální stroje a vysokou kvalifikaci pracovníků. Metodou přesného lití je však toto bez výraznějšího navýšení nákladů snadno proveditelné. Odlitek často dosahuje oproti původní konstrukci třískově obráběného dílce nižší váhy při současném dodržení všech mechanických hodnot. [23]

4.1 Odlévané materiály

Metodou vytavitelného modelu se dají odlévat téměř všechny slévatelné materiály. Hledají se i nové materiály, u kterých se musí posoudit jejich vhodnost pro použití v této technologii. **Přesné odlitky se nejčastěji vyrábějí z uhlíkových i legovaných ocelí, speciálních slitin a neželezných kovů.**

Oceli odlévané metodou vytavitelného modelu jsou oceli k nauhličování, oceli k zušlechťování, korozivzdorné austenitické oceli, korozivzdorné feriticko – martenzitické oceli, nástrojové oceli, žáruvzdorné oceli, atd. Skladba ocelí pro přesné odlitky bývá volena tak, aby co nejvíce odpovídala různým druhům válcovaných ocelí, používaných ve strojírenské výrobě. Oceli se odlévají do žhavých skořepin vyjmutých z žíhací pece. Uhlíkové oceli se za těchto podmínek oduhličují. Podle obsahu uhlíku je hloubka oduhličení 0,3 mm až 0,5 mm. U měkkých cementačních ocelí to nevádí, ale u konstrukčních ocelí je nutné oduhličení co nejvíce snížit a odlitky nauhličovat. U tenkostěnných odlitků se dá oduhličení zabránit použitím ocelí nízkolegovaných, které mají nižší obsah uhlíku, tím se

oduhličení neprojeví v tak velké míře. Čím vyšší je u uhlíkových ocelí obsah uhlíku, tím se lépe odlévají, jen mají sklon k naplyňování, to zvyšuje nebezpečí výskytu bublin v odlitku. Proto je také výhodné používat nízkolegované oceli. Slévateľnost ocelí stoupá do určité míry s obsahem slitinových prvků, proto se některé austenitické oceli velmi dobře odlévají. Odlitky z oceli jsou využívány v automobilovém a zbrojním průmyslu, v zemědělské technice, potravinářství i při výrobě náradí. [1], [7]

Hliníkové slitiny mají oproti slitinám jiných kovů dobrou slévateľnost, nízkou teplotu tavení, malý interval krystalizace. Slitiny hliníku mají dobrou chemickou stabilitu (odolnost vůči korozi), dobré povrchové vlastnosti odlitku a u většiny jejich slitin je nízká náchylnost k tvorbě trhlin za tepla. Hliník patří mezi nejběžnější technické kovy, je pevný, má malou hustotu, dobrou elektrickou a tepelnou vodivost. Nejběžnější odlévané slitiny Al jsou s prvky Si, Mg, Mn, Cu, Ti a Ni. Odlitky z těchto slitin se využívají ve všech průmyslových odvětvích. [7], [18], [20]

Kobaltové slitiny jsou nemagnetické polykrystalické superslitiny, které se odlévají ve vakuu. V některých případech se oproti ostatním superslitinám odlévá na vzduchu. Používají se na biomedicínské aplikace a ortopedické součásti. Má výjimečné mechanické vlastnosti, odolnosti vůči opotřebení a biokompatibilitu. Slitiny se s úspěchem používají na součásti leteckých turbínových motorů. Mají výbornou kombinaci mechanických (únavových a creepových) a korozních vlastností za vysokých teplot. [15]

Niklové slitiny, supeslitiny, které se používají především na vysokoteplotně namáhané součásti v leteckém a energetickém průmyslu. Mají velmi dobré mechanické vlastnosti, strukturní stabilitu za vysokých teplot a odolnosti vůči oxidaci. Vzhledem k obtížné obrobiteľnosti se součásti odlévají s minimálními přídávky na opracování. Slitiny obsahují s kyslíkem reagující prvky, proto je nezbytná aplikace vakuové technologie. [15]

Titanové slitiny mají podobné mechanické vlastnosti jako oceli, jejich hustota je však podstatně menší. Titan je kov nemagnetický, jeho pevnost rychle klesá se vzrůstající teplotou a je velmi odolný proti korozi. Odolává všem anorganickým, organickým kyselinám a zředěným alkalickým roztokům. Slitiny titanu mají větší pevnost než čistý kov, zvláště při vyšších

teplotách. Legujícími prvky jsou Cr, Mo, W a Al. Z těchto slitin se ve vakuu odlévají kloubní náhrady pro medicínu. [14]

Hořčíkové slitiny mají dobrou slévateľnost a hlavně slitiny s hliníkem mají výhodný poměr mezi hustotou a pevností, vysoký útlum, nízký modul pružnosti, dobrou vrubovou houževnatost, vyšší délkovou roztažnost. Použití nacházejí v dopravě, letectví a strojírenství. [18]

Mosazi jsou slitiny mědi a zinku. Zinek v určitém poměru zvyšuje pevnost i tažnost. Slévářenské mosazi jsou dobře obrobiteľné, protože se vyrábí s přídavkem olova. Z mosazi se vyrábí odlitky čerpadel, vodovodní armatury, ozubená kola a ventily. [17]

Bronzy jsou slitiny mědi a dalších prvků, cínu, hliníku a manganu s výjimkou zinku, který není nikdy v bronzu hlavní přísadou. Bronzy stejně jako mosazi mohou být binárními nebo vícesložkovými slitinami. Pro namáhané součásti se volí bronzy s 10% - 12% cínu s velmi malým množstvím Zn. Podobného složení se dříve užívalo k výrobě děl, dnes se název dělovina používá pro nejlepší, velmi houževnatý bronz. Z bronzu se vyrábí parní armatury, optická zrcadla a zvony. Z uměleckého bronzu, který je dobře slévateľný se odlévají sochy a umělecké předměty. [17]

4.2 Tavení a odlévání materiálu

Každá slitina pro výrobu odlitků má své specifické parametry tavení a zásady odlévání. Odlévání se provádí na vzduchu, ve vakuu nebo v řízené atmosféře. Odlévá se převážně do žhavých skořepiny vytažených z vypalovací pece nebo do studených forem, které jsou na teplotě okolí a jiného než křemenného složení. Chladnutí ve žhavých formách je pomalejší, ale nevzniká tak velký tepelný šok, tím nehrozí prnutí v materiálu skořepiny ani její destrukce. [1], [4], [6]

Základním způsobem odlévání je lití gravitační, sklopné a odstředivé.

Při **gravitačním lití** se kov odlévá z licích pánví, které jsou přehřáté. Menší pánve jsou vymazány žáruvzdornou hlínou, větší jsou vyzděny vyzdívkou. Pánve jsou ovládány mechanickým manipulátorem nebo v menších slévárnách ručně. Odlévání probíhá horní nálevkou nebo spodním otvorem. Výhodou spodního otvoru je, že struska na hladině taveniny nevnikne do dutiny formy. [1]

U **sklopného lití** se na odpichový otvor tavicí pece připevní forma tak, aby dutina formy byla spojená s pracovním prostorem pece. Forma se vyplní tekutým kovem tím, že se zařízení otočí o 180°. Aby se zlepšila jakost odlitků, dobře vyplnila dutina formy, přivádí se do pece stlačený vzduch. Na hladinu kovu tlačí vzduch přetlakem 0,5 bar – 1,5 bar. Tím je forma dobře vyplněna i v tenkých průřezích. [1]

Výroba odlitků, kde je kov tlačěn silou ke stěnám za rotace se nazývá **odstředivé lití**. Odlitek tuhne od vnějšího povrchu směrem dovnitř a vlivem odstředivé síly vznikne jemnozrnná struktura a dobrá homogenita. Forma je reprodukována do nejmenších detailů. [1]

4.2.1 Tavicí pece

Tavení kovu probíhá v pecích různého typu a provedení. Pece se dělí na plynové nebo elektrické, které jsou indukční, obloukové a odporové.

Plynové kelímkové pece jsou určeny k tavení barevných a drahých kovů. Základ kelímkové pece tvoří nosný rám. Pracovní prostor je ze žárobetonových tvarovek, tepelně izolovaných vláknitými keramickými materiály. Pracovní prostor je uzavřen víkem se zabudovaným odtahem spalin a tlumičem hluku. Ohřev pracovního prostoru zajišťuje plynový hořák.

Typy indukčních pecí jsou kelímková indukční, kanálková, indukční s použitím vakua nebo ochranné atmosféry.

Kelímková indukční pec je využita zejména pro tavení oceli. Na vnější straně keramického kelímku je vodou chlazený induktor, napájený ze zdroje střídavého proudu o frekvenci 50 Hz až 1 000 Hz. V důsledku indukovaných vířivých proudů a elektromagnetických sil dochází uvnitř kelímku k intenzivnímu proudění materiálu, což se projevuje i kopulovitým vzedmutím horní hladiny. Pohyb taveniny zaručuje rovnoměrné promíslení základní oceli s legovacími přísadami. [1], [6]

Kanálková indukční pec, ve které je tavenina v pracovní komoře s žáruvzdornou vyzdívkou, pod kterou je uložena primární indukční cívka navinutá na feromagnetickém jádru. Induktor z ohnivzdorného materiálu je tvořen jedním nebo několika kanálky, které jsou vyústěny do taveniny. Roztavený kov uvnitř kanálků tvoří sekundární závit nakrátko a působením elektromagnetických sil proudí z kanálků do taveniny, takže vsázka je

intenzivně promísena. Tyto pece se používají pro udržování neželezných kovů na konstantní teplotě. [21]

Odlitky vyšší jakosti je potřeba chránit před vlivy atmosféry. K tavení speciálních slitin se používají indukční pece, které jsou utěsněny, je odsát vzduch a plyny. **Indukčním tavením ve vakuu** se dosahuje dokonalého odplynění. V témž zařízení je možno pracovat s ochrannou atmosférou, např. argonu, má-li se legovat prvky s velmi nízkým bodem varu. Vhodně voleným postupem je možno přesně dosáhnout žádaného složení a mít kontrolu např. při odlévání reaktivních slitin titanu. [1], [6]

Materiál lze tavit také přímo v **elektrické obloukové peci**. Obloukové pece se liší od indukčních tím, že elektrický proud prochází přímo ohříváním materiálem a na něm se tvoří elektrický oblouk, který ho ohřívá, kdežto v indukčních pecích je materiál ohříván sekundárním indukovaným proudem. V materiálu se teplo šíří prouděním taveniny a vedením. Tato pec je využívána pro tavení ocelí. [1], [5], [6]

Elektrické pece odporové kelímkové se používají pro tavení slitin hliníku a jiných neželezných kovů, popř. pro udržování určitého objemu taveniny na konstantní teplotě. Tavení probíhá pomalu, hodinový výkon je nízký, odporový ohřev je do teplot 1000°C. Výhodou je dobrá regulovatelnost a čistota jejich provozu.

4.3 Dokončovací operace

Po vychladnutí lze odlitek uvolnit z formy. Chladnutí je závislé na vlastnostech formy i odlitku, jejich materiálech, hmotnosti a tvaru. Skořepina je velmi odolná, proto je účinné **rázové odstranění**. Keramika se otlouká dílenským kladivem nebo strojně ve vibrátorech a rotačních bubnech.

Po rázech zůstane někdy na odlitku napečený písek, a proto se tyto zbytky skořepin odstraní abrazivní metodou. U ocelových odlitků lze špatně přístupné zbytky formy odstranit i chemicky. [1], [6]

Abrazivně se zbytky skořepin odstraňují tryskáním pískových nebo kovových materiálů různých zrnitostí. Hliníkové a jiné slitiny, které nemají dostatečně tvrdý povrch, se tryskají menším tlakem i velmi jemným pískem nebo proudem kapaliny nesoucí částice brusiva.

Chemické metody jsou schopny odstranit i nedostupná místa keramických jader. Louží se v roztaveném hydroxidu sodném půl hodiny při teplotě 350 až 800°C. Po solné lázni jsou odlitky opláchnuty a vloženy do neutralizační kyseliny. Naopak dlouhá doba je potřeba v horké žíravé lázni hydroxidu draselného. Pracovní teplota je až 160°C a doba ponoření několik hodin. Po očištění jsou odlitky důkladně oplachovány horkou vodou a následně sušeny. Pro obtížnější, nepřístupná jádra, se používá **louhovacího autoklávu**. Louhovacím prostředkem je kyselina fluorovodíková. [1], [6]

Čistý odlitek se musí oddělit od vtokové soustavy. Vtoky lze **odlomit nebo urazit**, ale hrozí nebezpečí zalomení do odlitku, proto se odlitky oddělují řezáním **kotoučem, pilou, vodním paprskem nebo kyslíkem**. [1]

Cílem metody vytavitelného modelu je vyrábět „téměř na hotovo“ („near-net-shape“), tzn. bez nutnosti dalších dokončujících operací, ale některé odlitky jsou stále dle technické dokumentace dokončovány. Odlitky se **brousí, leští, honují, začistí se stopy po vtokové soustavě nebo se ošetří povrch proti oxidaci**. Také se využívá **tepelného zpracování**, lze tak měnit vlastnosti odlitku. [1], [4]

4.4 Kontrola a detekce vad

Na povrchu i uvnitř odlitku mohou vznikat vady, které jsou způsobeny jednotlivými chybami v procesu přesného lití. V každé výrobě je zavedena kontrola. Z každé tavby se dle požadavků zákazníka kontrolují všechny odlitky nebo jen některé. Jednotlivé výrobky se třídí na odlitky bez vady, opravitelné a na odlitky s vadami, které nelze tolerovat.

Nejprve se kontrolují **rozměry**. Rozměry se kontrolují měřením nebo dle předpřipravených přípravků. Moderní technologie umožňuje měřit pomocí třírozměrných počítačových modelů, které vytvoří snímací zařízení.

K vyhledávání vad slouží **defektoskopické zkoušky**, tj. bez porušení materiálu.

Zpravidla první kontrolou je povrch. Ke kontrole povrchu slouží **zkoušky vizuální**, přímo zrakem nebo nepřímo endoskopem. Mikrotrhliny na povrchu se zvýrazní **kapilárními metodami**. Povrch je potřen speciální kontrastní kapalinou, která pronikne do všech vad na povrchu. Z povrchu se setřením odstraní přebytečné množství, vady se zvýrazní po nanesení

vývojky, která reaguje s kapalinou vsáknutou v trhlinách povrchu. [1], [22]

Vady těsně pod povrchem lze detekovat **magnetoindukčně**, kontrolovaný materiál musí být feromagnetický, protože zkoušený předmět je magnetován a na jeho povrch je nanášen feromagnetický prášek. V místě vady se magnetické pole deformuje, siločáry se dostávají na povrch a zachycují částice prášku. [1]

Důležitou součástí je kontrola vnitřních vad. Na základě znalostí rychlosti šíření a odrazů vln v materiálu, můžeme odhalit skryté vady pomocí **ultrazvuku**. Ultrazvukový přístroj vyhodnocuje parametry odrazu a jeho časové prodlení v případě detekce vady. Vnitřní vady lze také detekovat **prozařovacími zkouškami**. Rentgenové nebo gama záření projde odlitkem, vadami projde lépe, tím se zviditelní na detektoru. [1], [22]

U odlitků se dále provádí metalografické hodnocení struktury a také kontrola chemického složení odlitku pomocí spektrální analýzy.

4.4.1 Vady odlitků

U odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu se nejčastěji vyskytují vnitřní vady - zadrobeniny, bubliny, staženiny, řediny, viz obr. 11. Na povrchu lze nejčastěji pozorovat výronky, kuličky, praskliny nebo připečeniny.

Špatným navržením nebo nedodržením technologického postupu lze pozorovat **nezaběhnutí materiálu**, při kterém nedojde k dokonalému vyplnění dutiny formy. Nejčastěji se objevuje v tenkých stěnách a složitých tvarech. [1]

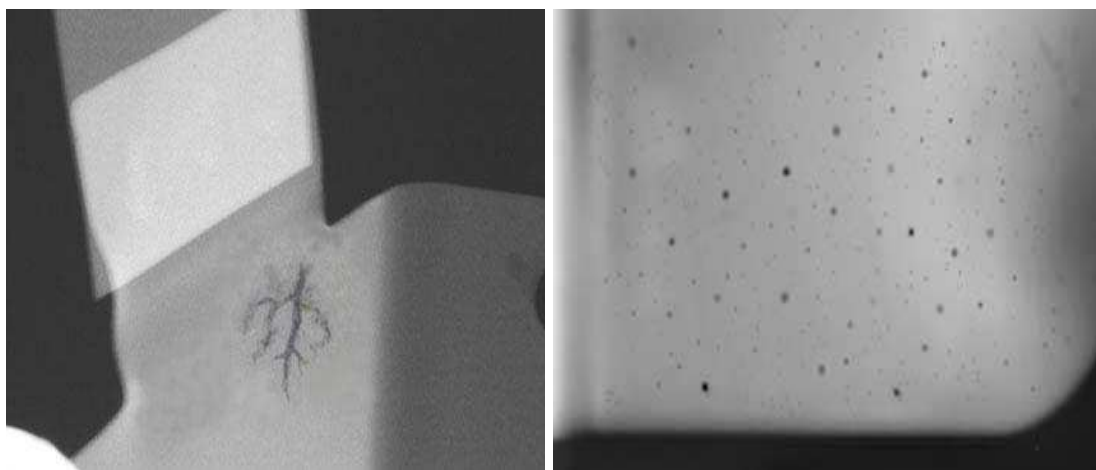
Zadrobeniny jsou vnitřní vady vmíseného formovacího materiálu v kovu. Materiál formovací směsi se do odlitku může dostat velkým proudem litého kovu. Proud kovu poškodí skořepinu, která se vydrolí do odlévaného materiálu. Zadrobeniny také vzniknou zanesením formovacího materiálu při nevhodné manipulaci nebo poškození skořepiny. [1]

Bubliny jsou vady, které oslabují odlitek. Plyn ve formě vzniká ze špatně odstraněných zbytků vosku nebo při výskytu vlhkosti.

Dutiny ve formě mohou vznikat i jako **staženiny a řediny**. Tento typ vad se vyskytuje u většiny technických slitin. Jejich podstata je spojena

s úbytkem objemu tzv. stahováním, ke kterému dochází v průběhu ochlazování taveniny a při tuhnutí v tepelném uzlu odlitku. [1]

U povrchových vad je špatný povrch hodnocen z hlediska opravitelnosti. Lze tak mechanicky odstranit vady ve formě **výronků a kuliček**, které vznikají zatečením odlévaného materiálu do prasklin nebo bublin formy. Na povrchu také vznikají **přípečeniny a nárosty**. Tyto vady jsou důsledkem spečení kovu s keramikou. [1]



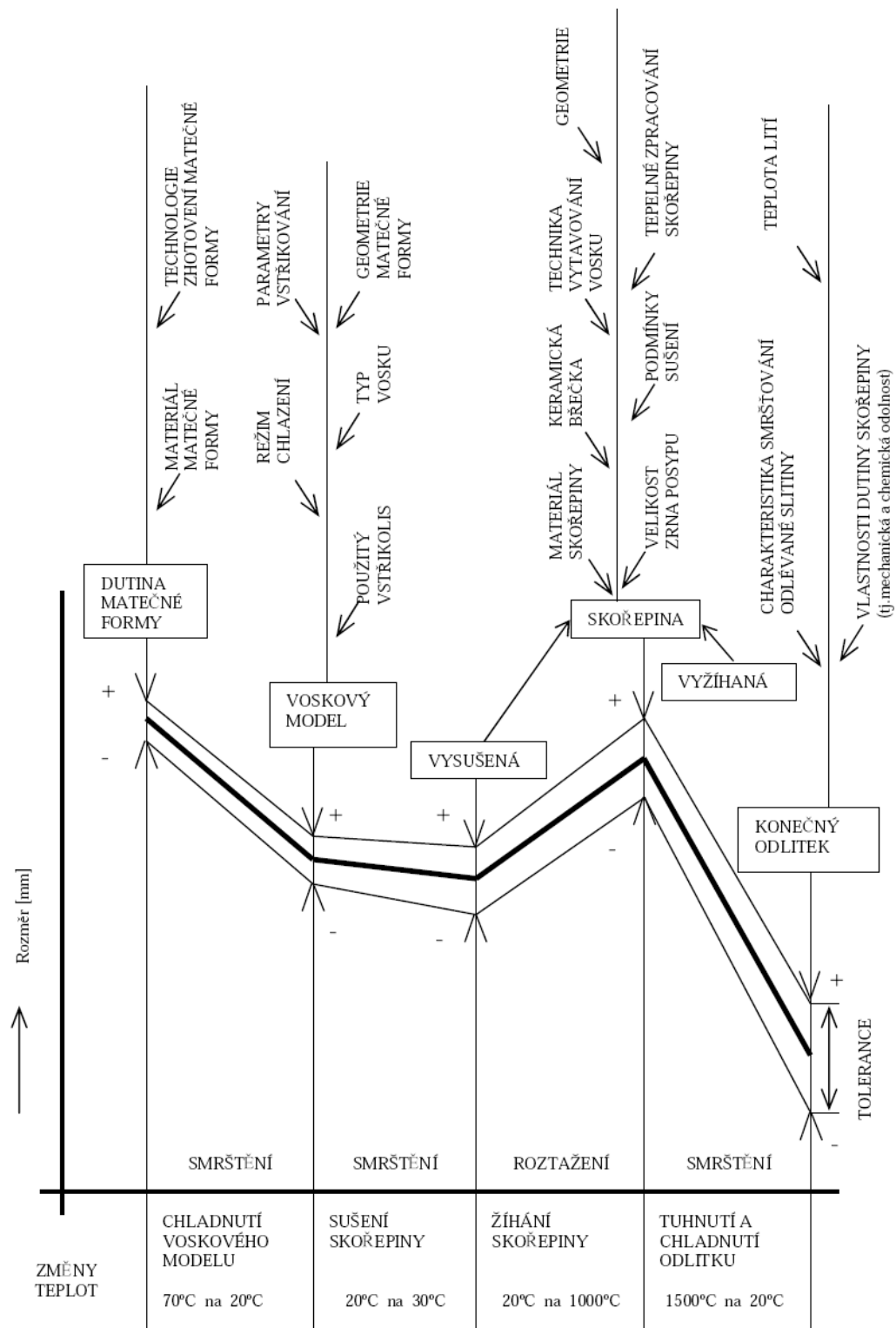
Obr. 11 Vady ve stěně odlitku (vlevo – staženina, vpravo – bubliny) [22]

4.5 Vlivy na kvalitu odlitku

Chybami v technologii vznikne nekvalitní výrobek, proto je potřeba eliminovat všechny negativní vlivy. Celý proces je velmi náročný a tím vzniká prostor pro velké množství chyb, které ve výsledku vedou k neshodnému výrobku.

Vyskytují se náhodné chyby, které vznikají náhodně, např. nevhodným zacházením je poškozen voskový model nebo skořepinová forma. Neshodné výrobky vznikají při špatném a nepřesném sestavení modelové soustavy nebo při nesprávném skladování voskových modelů i celých stromečků, protože se vlivem tepla snadno deformují.

Další kategorií jsou technologické chyby. Z hlediska technologičnosti má špatně navržená forma zásadní dopad na kvalitu odlitku. Při návrhu formy se projeví všechny rozměrové změny materiálů v závislosti na teplotě, tj. materiálu voskové směsi modelu, materiálu keramické formy a odlévaného materiálu, viz obr. 12. [1], [28]



Obr. 12 Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu [4]

4.5.1 Objemové změny voskové směsi

Vosky mají vysoký koeficient tepelné roztažnosti. Největší objemové změny nastávají při změně skupenství při teplotě tání. Směs zvětšuje při tavení svůj objem a po zaformování se smrští. Tyto objemové změny ovlivňuje kvalita a vlastnost voskové směsi. Aby se tyto změny eliminovaly, je nutné přizpůsobit technologii, parametry vstřikování vosku a konstrukci formy pro výrobu modelu. Při objemových skocích vznikají v modelu při chladnutí tlaková a tahová napětí. Tato napětí jsou právě důsledkem rozdílného chladnutí slabých a silnějších míst v modelu a mají za následek deformace, které mění geometrii modelu. Tyto objemové změny lze měřit dilatometrem, který sleduje expanzi voskové směsi v závislosti na teplotě. [1], [28]

4.5.2 Objemové změny keramické formy

Keramika má oproti voskům menší koeficient tepelné roztažnosti. Při vysoušení se celá keramická forma smrští, proto se může stát, že rozpraská. Formu mohou poškodit změny teploty, proto jsou požadovány konstantní teploty skladování. Změna nastane i při vypalování, kdy se forma při vysokých teplotách roztahuje, následným chlazením se částečně smrští. Roztažení skořepiny po žihání je u křemenné skořepiny mnohem vyšší (asi 4-6x) než u skořepiny molochitové. Velikost roztahování skořepiny při žihání je především ovlivňována teplotními charakteristikami roztahování posypových materiálů. Faktory ovlivňující objemové změny skořepiny jsou dané i tloušťkou vrstvy. [4], [28]

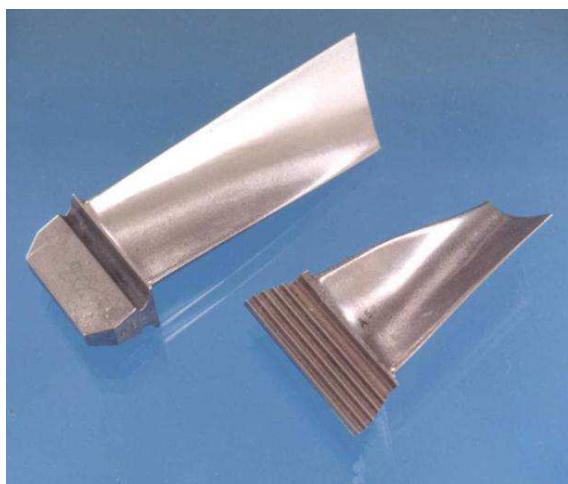
4.5.3 Objemové změny odlitků

Chladnutí slitin je vlivem růstu hustoty s klesající teplotou doprovázeno smršťováním, proto by ve výsledku keramická forma měla mít rozměry takové, aby výsledný odlitek měl požadované rozměry. Smrštění ztuhlého odlitku je příčinou vzniku vnitřního pnutí. Toto pnutí může vést k deformaci nebo k prasklinám. [1], [28]

5. Ukázky výroby odlitků na vytavitelný model

Metodou vytavitelného modelu se vyrábí odlitky tvarově rozmanité, s vysokou přesností a kvalitním povrchem. V České republice existuje celá řada firem zabývajících se výrobou odlitků touto technologií, které vyrábí odlitky určené pro různá odvětví průmyslu.

Například První brněnská strojírna Velká Bíteš, a. s. a její divize přesného lití je zaměřena na přesné lití oběžných i rozváděcích kol turbodmychadel do hmotnosti 20 kg a dále oběžných i rozváděcích lopatek plynových turbín. Tyto odlitky odlévají ze superslitin na bázi niklu. Pro leteckou techniku se odlévají oběžná a rozváděcí kola pomocných energetických jednotek. Jedná se o technicky velice náročné odlitky, pracující za teplot až 900°C. Dále se ve slévárně odlévají části klimatizačního systému letounů a turbínového motoru TJ 100. Taktéž odlévají odlitky pro zdravotnictví. [25]



Obr. 13 Lopatky plynových turbín [25]



Obr. 14 Turbodmychadlo [25]



Obr. 15 Odlitky pro leteckou techniku [25]

Slévárna H V H, s.r.o. se zabývá odléváním soch a uměleckých předmětů z bronzu.

Formu pro model vyrábí ze silikonu, který je v tenké vrstvě nanesen na jednotlivé části předlohy sochy. Do této formy zpevněné sádkou se vymačká zahřátý vosk, po jeho ztuhnutí vznikne model, který je opatřen vtokovými kanály a umístěn do rámu. Model je zalit směsí ze sádky a antuky. Vzniklá antuková forma je vložena na několik dní do pece, ve které se vytvrdí a model vypálí. Po odlití bronzu je tato forma rozbita a jednotlivé části sochy se svaří v ochranné atmosféře bronzovým drátem. Sváry jsou zabroušeny a povrch vzniklé sochy je patinován. [26]

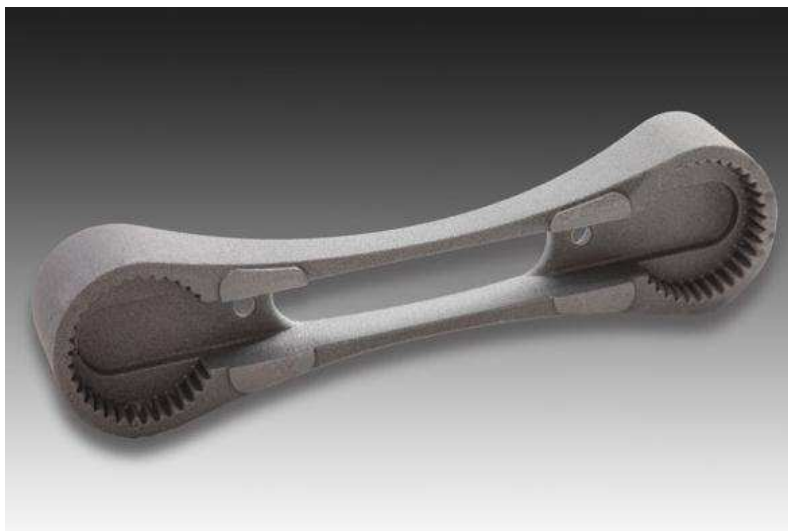


Obr. 16 Lea Vivot, Skokan, Acapulco, Mexiko [26]



Obr. 17 Josef Mařatka, Památník světové válce 1998, Praha [26]

Výrobou odlitků ze slitin hliníku pro letecký, obranný, elektrotechnický průmysl, pro medicínu a komunikace se zabývá firma Alucast, s.r.o. [7]

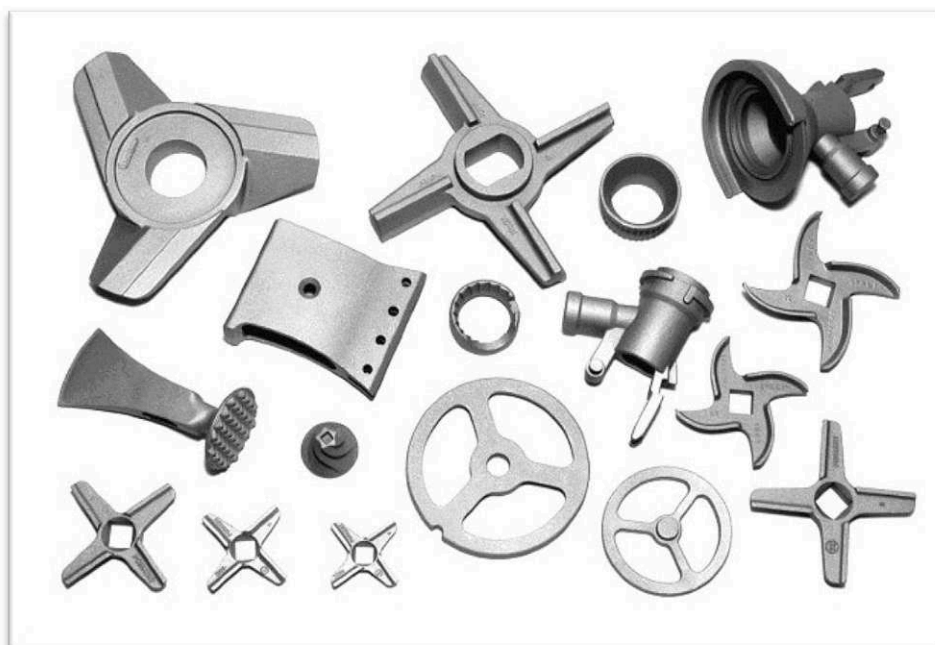


Obr. 18 Odlitek pro zdravotnictví [7]

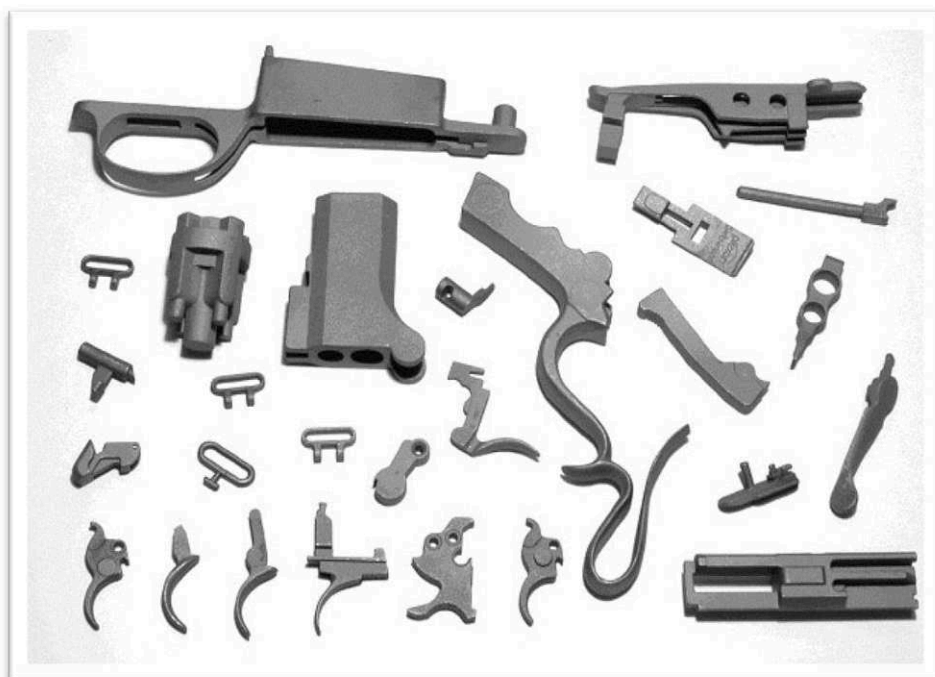


Obr. 19 Část motoru modelu auta [7]

Slévárna KDYNIUM a.s. vyrábí touto technologií odlitky ze slitin železa pro motocyklový, potravinářský, vojenský a automobilový průmysl. Také vyrábí odlitky pro manipulační techniku, nářadí, armatury a pro textilní průmysl. [24]



Obr. 20 Odlitky pro potravinářský průmysl [24]



Obr. 21 Odlitky pro zbrojní průmysl [24]

6. Závěr

Tato bakalářská práce shrnuje současné poznatky o technologii výroby odlitků metodou vytavitelného modelu a ukazuje možnosti jejich využití v průmyslu. Hlavní pozornost je věnována popisu technologického procesu výroby modelu, keramické formy a odlitku.

Tato technologie je stále perspektivní a využívá se pro výrobu složitých součástí rozmanitých tvarů. Mezi hlavní výhody této metody výroby odlitků patří zejména vysoká přesnost a velmi dobrá drsnost povrchu. Odlitky lze vyrobít až dle 12. stupně přesnosti a drsnosti povrchu jsou možné od Ra 3,2. Tloušťky stěn při lití slitin železných kovů jsou od 0,5 mm, u slitin neželezných kovů jsou od 0,3 mm.

Keramické formy (skořepiny) vyrobené pomocí vytavitelného modelu lze použít jen jednou a lze do nich odlévat téměř všechny slévárenské slitiny, např. z uhlíkových i legovaných ocelí, speciálních slitin i neželezných kovů.

Na začátku výrobního procesu je vytvořen model, který je z voskové směsi složené z různých komponent tak, aby model dosahoval požadovaných vlastností. Vosk je odstříknut do dutiny formy pro výrobu modelu. Zatuhlý model je sestaven do modelové soustavy, která je vytvořena zpravidla pájením těchto modelů na centrální vtokovou soustavu. Tímto způsobem se šetří čas, energie a zvyšuje se produktivita výroby.

Skořepina se vytvoří postupným vrstvením formovacích materiálů pojiva a ostřiva na povrch sestavených voskových modelů do stromečků. Skořepina je na stromečku vysušena a voskový stromeček se vytaví. Skořepinu je nutné žíhat. Žíháním je dosaženo pevnosti skořepiny, která musí vydržet tlak odlévaného kovu.

Do skořepiny vyjmuté z žíhací pece je odlita tavenina, po ztuhnutí odlitků se forma odstraní a odlitek je dokončen požadovaným způsobem.

Odlitek je vyroben se všemi výhodami této technologie, je tak konstruován s výztuhami, otvory, negativními úkosy a opatřen odlehčeními, která jsou z hlediska vysokých nákladů a složitosti při obrábění vynechány.

Technologie vytavitelného modelu se využívá v kusové i hromadné výrobě. Její nevýhodou je ekonomická náročnost výroby obráběné formy pro voskový model, složitý postup při návrhu odlitku, velká různorodost

používaných materiálů v procesu výroby skořepin a celá řada dalších vlivů, které se mohou negativně projevit na kvalitě odlitku.

Odlitky vyráběné touto technologií jsou určeny pro energetický, letecký a zbrojní průmysl. Velké uplatnění nacházejí i v automobilovém, potravinářském a zemědělském průmyslu, v medicíně i v umění.

Metoda vytavitelného modelu je již velmi stará, ale zdaleka nejsou vyčerpány všechny její technické možnosti.

- [1] DOŠKÁŘ, J., KAŠTÁNEK, O.: Přesné lití. Praha 1961.
- [2] Slévárenství č.1/2005. Brno
- [3] Slévárenství č. 11-12/2010. Brno
- [4] HORÁČEK, M.: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu. VUT v Brně 2009. Dostupné z WWW:
<<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>>
- [5] ELBEL, T.: Základy slévárenské technologie. VŠB – TU Ostrava 2006.
- [6] HERMAN, A.: Lití na vytavitelný model. Dostupné z WWW:
<<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>
- [7] Alucast s.r.o. Odlitky ze slitin hliníku. 2009. Dostupné z WWW:
<<http://www.alucast.cz/obransky-prumysl.html>>
- [8] Agro Tuřany, a.s. Technologie vytavitelného modelu, nedatováno. Dostupné z WWW: <http://www.agro-turany.cz/main.php?id=slevarna_presneho_liti&gr=3&nazev=Sl%20v%20na%20p%20f8esn%20ho%20lit%20ED&mn=2#posun>
- [9] Keramická jádra, nedatováno. Dostupné z WWW:
<http://www.efunda.com/eds/company_details.cfm/id2/5245/pv/NO/cp/Beijing%20Changhang%20Investment%20Casting%20Co.,Ltd./>
- [10] MICHNA, Š., NOVÁ, I.: Technologie a zpracování kovových materiálů, Adin, 1. Vydání, 2008.
- [11] Vstřikovací lisy, 2010. Dostupné z WWW:
<http://www.mayoengineering.com/modtech_wax_and_ceramic.php>
- [12] MM Průmyslové spektrum č. 4/2007
- [13] Electroforming s.r.o., galvanoplastika, 2008. Dostupné z WWW:
<<http://www.fakechoice.cz/ref/electroforming-s-r-o/src/cz/aktualni-projekty.html#galvanoplasticke-vlozky-forem>>
- [14] Titan a jeho slitiny. ZCU v Plzni, nedatováno. Dostupné z WWW:
<http://www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf>
- [15] Superslitiny, teorie - [online], nedatováno, VUT Brno. Dostupné z WWW:
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/PHMV/ni_m247.html>

- [16] C.R.P. Technology S.r.l., Rapid prototyping, 2010. Dostupné z WWW: <<http://www.crptechology.com/sito/en/processes/rapid-casting.html>>
- [17] Měď a její slitiny. ZCU v Plzni, nedatováno. Dostupné z WWW: <http://www.benjamin.ic.cz/Cu_slitiny.pdf>
- [18] Neželezné kovy. ZCU v Plzni, nedatováno. Dostupné z WWW: <<http://tzs.kmm.zcu.cz/nezelez2.pdf>>
- [19] Sdružení přesného lití. Dostupné z WWW: <<http://www.presneliti.info/>>
- [20] Hliník a jeho slitiny. ZCU v Plzni, nedatováno. Dostupné z WWW: <http://www.benjamin.ic.cz/hlinik_slitiny.pdf>
- [21] Indukční ohřev. FEL CVUT Praha, nedatováno. Dostupné z WWW: <http://puma.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev>
- [22] Defektoskopie Liberec, s.r.o., 2009. Dostupné z WWW: <<http://www.def-liberec.cz/nedestruktivni-zkouseni>>
- [23] Slévárenství č.9/2008. Brno
- [24] KDYNIIUM a.s. Odlitky železných slitin, nedatováno. Dostupné z WWW: <<http://www.kdynium.cz/cesky.asp?pid=p3>>
- [25] První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s., 2000-2011. Dostupné z WWW: <http://www.pbsvb.cz/dme_vyrobní_program.php>
- [26] Umělecká slévárna HVH s.r.o., Hostinné, nedatováno. Dostupné z WWW: <http://www.pbsvb.cz/dme_vyrobní_program.php>
- [27] WSC CO. Technologie metody vytavitelného modelu. Dostupné z WWW: <http://www.wscbucket-teeth.com/OTHER_MACHINERY_PRODUCTS/Investment-Casting-Parts.html>
- [28] KRACMAN, O.: Faktory ovlivňující přesnost odlitků u metody vytavitelného modelu. FS CVUT Praha, nedatováno. Dostupné z WWW: <http://www.fsid.cvut.cz/cz/u218/stc/Sbornik/S3/Kracman_Ondrej_12133.pdf>
- [29] Rapid prototyping, 2002. Dostupné z WWW: <<http://www.jharper.demon.co.uk/rptc01.htm>>
- [30] MM Průmyslové spektrum č. 1/2001

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu užití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 27. 5. 2011

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 27. 5. 2011

Signature: